

Journal of Water and Wastewater, Vol. 32, No.2, pp: 68-79

# Solvent Extraction of Strontium from Leach Liquor of Central Iran Metasomatic Ores Using Macrocyclic Crown Ether Ligands

S. Alamdar Milani<sup>1</sup>, M. Hafizi<sup>2</sup>, H. Abolghasemi<sup>3</sup>, F. Zahakifar<sup>4</sup>

1. Assoc. Prof., Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran
2. MSc Graduate Student, Dept. of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Prof., Dept. of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
4. Assist. Prof., Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran  
(Corresponding Author) [Fzahakifar@aeoi.org.ir](mailto:Fzahakifar@aeoi.org.ir)

(Received May 8, 2020 Accepted Aug. 11, 2020)

#### To cite this article:

Alamdar Milani, S., Hafizi, M., Abolghasemi, H., Zahakifar, F. 2021. "Solvent extraction of strontium from leach liquor of central Iran metasomatic ores using macrocyclic crown ether ligands" Journal of Water and Wastewater, 32(2), 68-79. Doi: 10.22093/wwj.2020.230420.3019. (In Persian)

## Abstract

Strontium is one of the alkaline earth metals in the periodic table. This element has various uses. In this research, solvent extraction of strontium from leach liquor of central Iran metasomatic ores was studied with macrocyclic crown ether ligands. Many crown ethers were used as extractants. Strontium was quantitatively extracted from picrate media by dicyclohexyl 18-crown-6 (DCH18-C-6) in 1,2-dichloroethane, and determined by flame emission spectrometry. Here, the factors affecting SX of Sr from synthetic solutions of strontium (containing 40 mg/L Sr) in sulfuric acid medium were identified. 0.01 mol/L DCH18C6 in 1,2-dichloroethane, 0.01 mol/L picric acid in aqueous phase, aqueous to organic (A/O) ratio of 1, pH 4 and extraction time of 5 min are the optimum values for affective factors. The precipitation with sodium hydroxide was conducted to remove the leaching impurities such as Fe, Mg, Al. Under optimal conditions, strontium extraction from leaching filtrate of metasomatic ores of central Iran (pH=2.7), in the presence of 0.01 mol/L picric acid, using 0.01M DCH18-C-6 in 1,2-dichloroethane was performed with a yield of 92.3%. The Sr stripping was obtained with 6 mol/L of hydrochloric acid, with A/O volume ratio of 1:1, with a yield of ~60%.

**Keywords:** Strontium; Leach Liquor, Metasomatic Ores, Central Iran, Solvent Extraction, DCH-18-Crown-6.

مجله آب و فاضلاب، دوره 32، شماره 2، صفحه: 68-79

## استخراج حلالی استرانسیم از محلول فروشویی سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی با استفاده از لی گاندهای درشت حلقه‌ای کرون اتر

سعید علمدار میلانی<sup>۱</sup>، میثم حفیظی<sup>۲</sup>، حسین ابوالقاسمی<sup>۳</sup>، فاضل ضحاک‌فر<sup>۴</sup>

۱- دانشیار، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای،

سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴- استادیار، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای،

سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

(نویسنده مسئول) [Fzahakifar@aeoi.org.ir](mailto:Fzahakifar@aeoi.org.ir)

پذیرش ۹۹/۵/۲۱

(دریافت ۹۹/۲/۱۹)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

علمدار میلانی، س.، حفیظی، م.، ابوالقاسمی، ح.، ضحاک‌فر، ف.، ۱۴۰۰، "استخراج حلالی استرانسیم از محلول فروشویی سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی با استفاده از لی گاندهای درشت حلقه‌ای کرون اتر" مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۲)، ۶۸-۷۹. Doi: 10.22093/wwj.2020.230420.3019

### چکیده

استرانسیم یکی از فلزات قلیایی در جدول تناوبی است. این عنصر کاربردهای مختلفی دارد. در این پژوهش، استخراج حلالی (SX) استرانسیم (Sr) از محلول فروشویی سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی توسط لی گاندهای درشت حلقه‌ای کرون اتر بررسی شد. تعدادی کرون اتر به‌عنوان استخراج‌کننده استفاده شد. استرانسیم به‌طور کمی از محیط پیکرات توسط دی سیکلوهگزیل-۱۸-کرون-۶ (DCH۱۸-C-۶) در ۱، ۲، دی کلرواتان استخراج و با استفاده از طیف‌بینی نشری شعله‌ای تعیین مقدار شد. در این جا، عوامل مؤثر بر استخراج حلالی استرانسیم از محلول‌های ساختگی استرانسیم (حاوی ۴۰ mg/L استرانسیم) در محیط سولفوریک اسید شناسایی شدند. DCH۱۸-C-۶ ۰/۰۱ mol/L در کلوفرم، ۰/۰۱ mol/L پیکریک اسید در فاز آبی، نسبت فاز آلی - به - آبی pH ۱ تا ۴ و زمان استخراج ۵ دقیقه مقدار بهینه برای عوامل مؤثر در فرایند استخراج با حلال هستند. رسوب‌گیری با سدیم هیدروکسید برای حذف ناخالصی‌هایی از جمله آهن، منیزیم، آلومینیم از محلول فروشویی انجام شد. تحت شرایط بهینه، استخراج استرانسیم از محلول زیرصافی محلول فروشویی سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی pH برابر ۲/۷، در حضور ۰/۰۱ mol/L پیکریک اسید با استفاده از DCH ۱۸-C-۶، ۰/۰۱ M، در ۱، ۲، دی کلرواتان با بازده ۹۲/۳ درصد انجام شد. بازیابی Sr از فاز آلی باردار، با ۶ mol/L هیدروکلریک اسید، با نسبت فاز آلی - به - آبی ۱:۱، با بازده حدود ۶۰ درصد به انجام رسید.

**واژه‌های کلیدی:** استرانسیم، محلول فروشویی، سنگ‌های متاسوماتیک، ایران مرکزی، استخراج با حلال، دی سیکلوهگزیل ۱۸-کرون اتر - ۶



## ۱- مقدمه

استرانسیم جزء فلزات قلیایی خاکی گروه دوم جدول تناوبی با کمترین فراوانی در بین آنهاست. خصوصیات شیمیایی این فلز حد واسط بین خصوصیات شیمیایی کلسیم و باریوم است. استرانسیم فلزی با واکنش پذیری زیاد بوده و معمولاً در طبیعت پراکنده است. استرانسیم، ۰/۰۲ تا ۰/۰۳ درصد از پوسته زمین را تشکیل داده و در سنگ‌های آذرین با مقدار میانگین ۳۷۵ mg/kg موجود است. این عنصر در آب دریا از لحاظ فراوانی پنجمین یون فلزی با محتوای ۱۴ mg/L است. استرانسیم در ساخت شیشه جاذب پرتو ایکس برای لامپ‌های پرتو کاتدی و صفحه تلویزیون، در تهیه روی الکترولیتی<sup>۱</sup>، الکتروسرامیک‌ها، ابررساناهای اکسیدی و فوتوکاتالیست‌ها برای تخریب آلاینده‌های آلی کاربرد دارد (Bingöl et al., 2012, Owusu and Litz, 2000).

محلول فروشویی سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی محتوی عناصر زیادی از جمله عناصر با ارزش نادر خاکی، اورانیوم، زیرکیم، هافنیم و استرانسیم است. مقدار استرانسیم در محلول‌های فروشویی سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی در حدود ۴۰ mg/L است (Hafizi, 2009).

تاکنون استخراج با حلال به‌عنوان یک روش اصلی جداسازی  $Sr^{2+}$  از محیط‌های آبی و پساب‌های سطح بالا در نظر گرفته شده است. ترکیبات آلی آب‌گریز معمولاً به‌عنوان رقیق‌کننده‌ها استفاده می‌شوند، در حالی که کرون اترهای درشت - حلقه به دلیل اندازه حفره مشابه با قطر یون  $Sr^{2+}$  به‌عنوان استخراج‌کننده انتخاب می‌شوند. کرون اترها استخراج فلزات با سازوکار استخراج به اصطلاح میهمان - میزبان<sup>۲</sup> را تسهیل کرده‌اند. این ترکیبات، پلی اترهای حلقه‌ای بزرگ هستند که کاتیون موردنظر به‌عنوان مهمان در داخل حلقه آنها (حلقه میزبان) وارد می‌شود. تشکیل کمپلکس‌ها با کاتیون‌ها از طریق برهم‌کنش الکترواستاتیکی یون - دو قطبی بین کاتیون و اتم اکسیژن الکترون‌دهنده با بار منفی انجام می‌شود. سپس، کمپلکس کاتیون - کرون اتر با یک آنیون (که از نظر الکتریکی خنثی است) وارد فاز آلی می‌شود (Patai and Rappoport, 1989, Patai, 1980, Takeda et al., 2004, Dozol et al., 2004, Sadakane et al., 1975, Kimura et al., 1979).

پژوهش‌های گسترده در این زمینه‌ها انجام شده است (Ye et al., 2001, Dozol et al., 2000, He et al., 1993).

پدرسن برای اولین بار کرون اتر با درشت حلقه‌هایی مانند ۱۸- کرون ۶- (۱۸C۶) را ساختند که استخراج‌گر مناسبی برای  $Sr^{2+}$  بود. برای بهبود قدرت آب‌گریزی ۱۸C۶، دی سیکلو هگزانو -۱۸- کرون ۶ (DCH۱۸C۶)، پس از این که دو سیکلو هگزیل بر روی پلی‌استر حلقوی کاشته شد، ساخته شد (Pedersen, 1967).

جداسازی مؤثر  $Sr^{2+}$  با استفاده از DCH۱۸C۶ در رقیق‌کننده‌های مختلف به‌عنوان استخراج‌کننده به‌طور گسترده گزارش شده است. هورویتز و همکاران اثر رقیق‌کننده‌های مختلف، از جمله استرها (نرمال بوتیل استات، ۳- متیل بوتیل استات، نرمال هگزیل استات)، کتون‌ها (۲- هگزانون، ۴- متیل -۲- پنتانون و ۲- اکتانون)، الکل‌ها (نرمال آمیل، نرمال هگزیل و نرمال هپتیل) و کربوکسیلیک (پنتانوئیک، هگزانوئیک، هپتانوئیک و اکتانوئیک) بر روی بازده استخراج  $Sr^{2+}$  با DCH۱۸C۶ و مشتق دیترت بوتیل آن (DTBCH۱۸C۶) را به‌عنوان استخراج‌کننده بررسی کردند. مشخص شد که به‌عنوان یک حلال مقیاس فرایندی بالقوه<sup>۳</sup>، نرمال اکتانول از نظر خواص فیزیکی (به‌عنوان مثال نقطه اشتعال) بهترین انتخاب است. با این حال، هنگامی که غلظت کرون اتر و غلظت نیتریک اسید بسیار بالا نبود، رفتار استخراجی نامطلوب نیز مشاهده شد (Horwitz et al., 1990).

کومار و همکاران استخراج استرانسیم از محیط نیتریک اسید با استفاده از DCH۱۸C۶ در مخلوط ۲۰/۸۰ درصد بوتانول/نرمال اکتانول را بررسی کرده، گزارش داد که با این رقیق‌کننده مخلوط در مقایسه با انواع رقیق‌کننده‌های الکلی خالص مقدار نسبت توزیع<sup>۴</sup> بالاتر به دست می‌آید (Kumar et al., 1997). در مقایسه با حلال استخراج استرانسیم (نرمال اکتانول خالص)، نشان داده شد که بازده مطلوب استخراج و استخراج معکوس<sup>۵</sup> با ۲۰/۸۰ درصد حجمی تولوئن/نرمال اکتانول استفاده شده به‌عنوان رقیق‌کننده برای DTBCH۱۸C۶، حاصل می‌شود، که در اصل در رقیق‌کننده مخلوط نسبت به نرمال اکتانول، در جذب اسید کمتر دخیل است (Raut et al., 2009).

<sup>3</sup> Potential Process-Scale Solvent

<sup>4</sup> Distribution Ratio

<sup>5</sup> Back-Extraction

<sup>1</sup> Electrolytic Zinc Process

<sup>2</sup> Guest-Host Mechanism



۱۸ کرون-۶ در انواع رقیق‌کننده‌ها شامل نرمال دودکان، دی کلرومتان، کروزن، کلروفرم، نیتروبنزن و ۱، ۲ دی کلرو اتان با هدف ارزیابی عملکرد استخراجی آنها و بهینه‌سازی فرایند استخراج انجام شد. با توجه به منابع، این پژوهش اولین تلاش برای استخراج استرانسیم از محلول فروشویی بسیار اسیدی سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی با استفاده از تکنیک استخراج با حلال است. تأثیر عوامل مختلف مؤثر بر استخراج و بازیابی از فاز آلی (استخراج معکوس) با جزئیات در شرایط آزمایش در روش ناپیوسته بررسی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد شیمیایی

محلول ساختگی حاوی  $40 \text{ mg/L}$  استرانسیم از انحلال  $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (مرک با خلوص ۹۹/۹ درصد) وزن شده، در آب مقطر تهیه شد. برای تولید آنیون‌های حجیم<sup>۱</sup> پرکلریک اسید یا پیکریک اسید (رویالکس<sup>۲</sup>) به محلول ساختگی اضافه شد. فاز آلی، استخراج‌کننده کرون اتر [۱۸C۶، پلی دی بنزو ۱۸-کرون-۶، ۱۵ کرون-۶، دی بنزو ۲۴ کرون-۸، دی سیکلو هگزیل ۱۸ کرون-۶ و دی بنزو ۱۸ کرون-۶] (مرک) در دودکان، دی کلرومتان، کروزن، کلروفرم، نیتروبنزن و ۱، ۲ دی کلرو اتان (مرک<sup>۳</sup>) به‌عنوان رقیق‌کننده بود. سایر مواد شیمیایی مانند سولفوریک، نیتریک و هیدروکلریک اسید از شرکت مرک تهیه شد.

### ۲-۲- تجهیزات

سانتریفوژ LZD4-0.8 و تکاننده IKA Genius 3. اندازه‌گیری Sr با یک طیف‌سنج نشری شعله‌ای مجهز به تصحیح گسیل زمینه با مدولاسیون طول موج<sup>۴</sup> انجام شد.

### ۲-۳- روش کار استخراج و استخراج معکوس

۱۰ میلی‌لیتر محلول ساختگی حاوی ۴۰ میلی‌گرم در لیتر استرانسیم یا محلول زیرصافی محلول فروشویی همراه با  $0.1 \text{ mol/L}$  به جز

در پژوهشی دیگر، رقیق‌کننده مخلوط دیگری شامل نرمال اکتانول و کلروفرم پیشنهاد شده است. مشاهده شد که رقیق‌کننده مخلوط ۱:۱ منجر به بیشترین مقدار نسبت توزیع در هنگام استفاده از DTBCH\18C6 به‌عنوان استخراج‌کننده  $\text{Sr}^{2+}$  می‌شود. استخراج هم‌افزای نرمال اکتانول و کلروفرم برای توضیح این نتایج تجربی استفاده شد (Mohapatra et al., 2006).

علاوه بر استفاده از رقیق‌کننده‌های دوتایی متشکل از نرمال اکتانول و یک ماده آلی دیگر برای بهبود عملکرد استخراج، برخی از رقیق‌کننده‌های شناخته شده دیگر با هدف استخراج استرانسیم نیز پیشنهاد شده‌اند. سو و همکاران عملکرد استخراجی  $\text{Sr}^{2+}$  با استفاده از DCH\18C6 به‌عنوان استخراج‌کننده در استیلین تتراکلرید (TCA) را بررسی کردند و مشخص شد که بازده استخراج  $\text{Sr}^{2+}$  می‌تواند در غلظت  $1 \text{ mol/L}$  تا ۹۲ درصد برسد. عملکرد بهتر عریان‌سازی نیز در هنگام استفاده از آب بدون یون به‌عنوان عامل عریان‌ساز به دست آمده است. با این حال، رقیق‌کننده TCA نوعی هالویدروکربن ناپایدار است که به راحتی تجزیه می‌شود، بنابراین استفاده از آن به تنهایی در مقیاس بزرگ توصیه نمی‌شود. با توجه به ظرفیت استخراج زیاد و کاستی‌های TCA، عملکرد استخراجی رقیق‌کننده دوتایی TCA و نرمال اکتانول باید بررسی شود (Xu et al., 2013).

پژوهش‌های اخیر نشان داده است که فروشویی با سولفوریک اسید یک روش مؤثر برای استخراج استرانسیم و سایر عناصر با ارزش از سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی است (Hafizi, 2009).

به‌منظور تخریب ساختار کان سنگ و دستیابی به حداکثر بازده فروشویی، غالباً غلظت بالای از سولفوریک اسید مورد نیاز است که منجر به محلول فروشویی با اسیدیته بالا می‌شود ( $10.8 \text{ M}$ ). فروشویی اسیدی سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی به روش هضم سولفوریک اسیدی برای به‌دست آوردن محلول فروشویی حاوی استرانسیم، توسط حقیقی در سال ۲۰۰۹ انجام شده است (Hafizi, 2009).

در این پژوهش، استخراج استرانسیم از محلول فروشویی کانسار متاسوماتیک آنومالی ۵ ساغند، توسط محلولی از انواع کرون اتر شامل ۱۸C۶، پلی دی بنزو ۱۸-کرون-۶، ۱۵ کرون-۶، دی بنزو ۲۴ کرون-۸، دی سیکلو هگزیل ۱۸ کرون-۶ و دی بنزو

<sup>1</sup> Bulky Anions

<sup>2</sup> Royalex

<sup>3</sup> Merck

<sup>4</sup> Wavelength Modulation Background Correction Flame Emission Spectrometer



### ۲-۳- خالص سازی محلول فروشویی

هضم اسیدی کنسانتره سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی با نسبت جامد/مایع ۳ در ۲۰۰ درجه سلسیوس، در مدت زمان ماند ۲ ساعت با سولفوریک اسید ۱۰/۸ مولار به‌عنوان عامل فروشویی و نیتریک اسید ۵/۳ مولار به‌عنوان اکسیدان منجر به استخراج ۴۴/۵۶ میلی‌گرم در لیتر استرانسیم شد. نتایج تجزیه عنصری استرانسیم و سایر عناصر در محلول فروشویی سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی در جدول ۱ نشان داده شده است. در محلول فروشویی، عیار لانتانیدها بسیار کم و عیار برخی یون‌ها مانند آهن، کلسیم، منیزم، آلومینیم و منیزیم بسیار زیاد است (Hafizi, 2009) و قبل از استخراج حلالی استرانسیم، باید به‌میزان قابل توجهی کاهش یابد. برای انجام این، با علم به این که بیشتر این عناصر مزاحم در pH برابر با ۳/۵ تا ۴ رسوب می‌کنند، رسوب‌گیری در سانتریفوژ با سرعت ۶۰۰۰ rpm در حضور بافر استات با تنظیم pH محیط در ۴ در دمای ۵۰ درجه سلسیوس، و در مدت ۵ دقیقه به انجام رسید. از عیارسنجی محلول زیرصافی<sup>۲</sup> میزان حذف عناصر مزاحم و استرانسیم تعیین شد (جدول ۲).

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- استخراج استرانسیم از محلول ساختگی

##### ۳-۱-۱- انتخاب استخراج کننده

ترکیبات درشت حلقه‌ای (کرون اترها)، به‌ویژه ۱۸C۶، پلی دی بنزو ۱۸-کرون-۶، ۱۵-کرون-۶، دی بنزو ۲۴-کرون-۸، دی سیکلوهگزیل ۱۸-کرون-۶ و دی بنزو ۱۸-کرون-۶ به‌عنوان استخراج‌کننده بررسی شدند.  $0.01 \text{ mol/L}$  از هر کدام از این کراون اترها در رقیق‌کننده ۱، ۲، دی‌کلرو اتان با فاز آبی مخلوط شد. غلظت پیکریک اسید در فاز آبی نیز  $0.01 \text{ mol/L}$  انتخاب شد (Omidvari, 2007). نتایج این بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کرون اترهای دی‌سیکلوهگزیل و ۶-کرون-۱۸ نسبت به سایر استخراج‌کننده‌ها بسیار بهتر عمل می‌کنند. دلیل برتری این دو کرون اتر در این است که این دو لی‌گاند دارای قطر حفره متناسب با ابعاد استرانسیم، برای گیر انداختن استرانسیم هستند، چون کرون اترهای مختلف قطر

آزمایش‌های بررسی اثر غلظت پیکریک اسید در فاز آبی، پیکریک اسید برای تولید آنیون‌های حجیم، با  $10 \text{ mL}$  فاز آلی (۱۸C۶)، پلی دی بنزو ۱۸-کرون-۶، ۱۵-کرون-۶، دی بنزو ۲۴-کرون-۸، دی سیکلوهگزیل ۱۸-کرون-۶ و دی بنزو ۱۸-کرون-۶ در [دودکان، دی کلرومتان، کروزن، کلروفرم، نیتروبنزن و ۲،۱ دی‌کلرو اتان به عنوان] رقیق‌کننده با استفاده از تکانه، به مدت ۵ دقیقه مجاور شد. مخلوط برای جداسازی دو فاز آلی و آبی به قیف جداکننده منتقل شد. جدایش کامل در ۱۰ دقیقه انجام شد. غلظت Sr در فاز آبی با استفاده از طیف‌سنج نشری شعله‌ای تعیین شد و در نتیجه، غلظت یون فلزی در فاز آلی از موازنه جرم به دست آمد. برای استخراج معکوس یون فلزی از فاز آلی با دار در فاز آبی تازه، فاز آلی باردار با محلول نیتریک- یا هیدروکلریک اسید با غلظت‌های مختلف به مدت ۵ دقیقه مخلوط شد. روش تجزیه عیارسنجی مانند استخراج بود.

ضریب توزیع<sup>۱</sup> (D) مطلوب‌ترین شاخص برای تعیین پاسخ فرایند استخراج با حلال بوده و به صورت نسبت غلظت تعادلی فلز صرف نظر از شکل شیمیایی آن در فاز آلی به غلظت تعادلی آن صرف نظر از شکل شیمیایی آن در فاز آبی تعریف می‌شود

$$D = \frac{C_0 - C}{C} \quad (1)$$

که در آن

$C_0$  و  $C$ ، به ترتیب، غلظت اولیه و غلظت تعادلی یون فلزی در فاز آبی است.

با استفاده از ضریب توزیع درصد استخراج چنین محاسبه شد

$$E = \frac{100D}{D + V_{aq} / V_{org}} \quad (2)$$

در مواردی که حجم فازهای آلی و آبی برابر باشد، معادله (۲) به معادله زیر کاهش می‌یابد

$$E = \frac{100D}{1 + D} \quad (3)$$

<sup>2</sup> Filtrate

<sup>1</sup> Distribution Coefficient



جدول ۱- ترکیب شیمیایی محلول فروشویی

Table 1. The chemical composition of the leach liquor

Element	Al	Ca	Fe	Mg	Sr
Concentration (mg/L)	1241.189	498.233	2233.514	1007.677	44.56
Element	Sm	Y	Dy	U	Nd
Concentration (mg/L)	2.7	15	9.4	76.36	116
Element	Th	La	Ce		
Concentration (mg/L)	28.62	11.1	10.24		

جدول ۲- میزان حذف عناصر مزاحم و استرانسیم

Table 2. The value of removal of disturbing and strontium elements

Element	Al	Ca	Fe	Mg	Sr
Removal (%)	33.82	22.42	97.25	24.60	9.02

یکسان پیکریک اسید را ترسیم می‌کند. همان طور که مشاهده می‌شود، بازیابی استرانسیم تا غلظت  $0.01 \text{ mol/L}$  کرون اتر، به شدت به غلظت کرون اتر بستگی دارد و در ورای آن تغییر چندانی نمی‌کند. نتیجه جالب توجه، رسیدن به حد تقریبی ۹۲ درصد در غلظت‌های خیلی پایین‌تر از  $0.01 \text{ mol/L}$  کرون اتر است. از این رو با توجه به قیمت نسبتاً زیاد کرون اتر، غلظت  $0.01 \text{ mol/L}$  به عنوان غلظت بهینه استخراج کننده برای استخراج استرانسیم (۹۸ درصد) انتخاب شد.

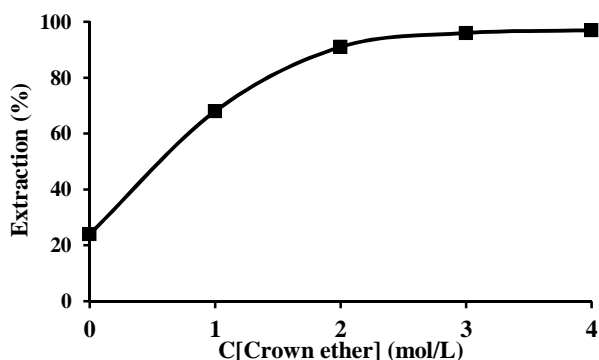


Fig. 2. Effect of crown ether concentration on strontium extraction percentage

(Time=5 min, T= 25 °C, Aqueous volume =10 mL, Organic volume= 10 mL, [Picric acid] = 0.01 mol/L, [Sr]=40 mg/L)

شکل ۲- اثر غلظت کرون اتر بر درصد استخراج استرانسیم

شرایط آزمایش: (زمان ۵ دقیقه، دما ۲۵ درجه سلسیوس، حجم فاز آبی ۱۰ میلی لیتر، حجم فاز آلی ۱۰ میلی لیتر، [اسید پیکریک]  $0.01 \text{ mol/L}$ ، [استرانسیم]  $40 \text{ میلی گرم در لیتر}$ )

حفره متفاوت دارند. از طرفی به دلیل این که ۶-کرون - ۱۸ انحلال پذیری زیادی در فاز آبی دارد و این از عیب‌های یک استخراج کننده به شمار می‌رود، بنابراین دی سیکلو هگزیل برای ادامه کار انتخاب شد.

۳-۱-۲- اثر غلظت کرون اتر

شکل ۲ نتایج حاصل از بررسی اثر غلظت کرون اتر بر استخراج استرانسیم، با غلظت‌های متفاوت دی سیکلو هگزیل و غلظت‌های

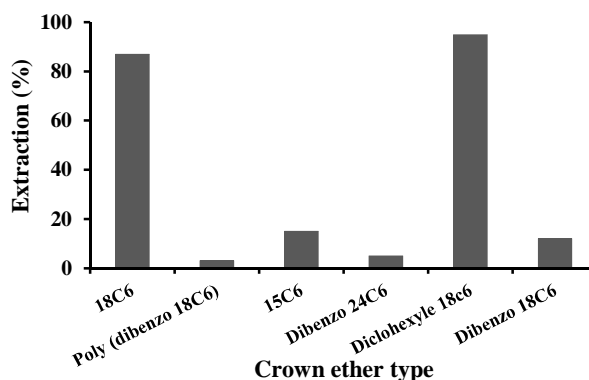


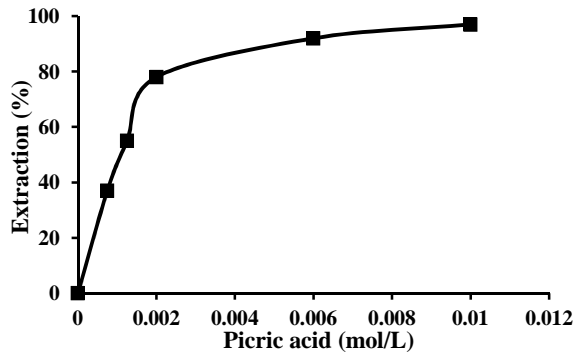
Fig. 1. Effect of crown ether type on strontium extraction percentage

(Time=5 min, T= 25 °C, Aqueous volume =10 mL, Organic volume= 10 mL, Extractant= 0.01 mol/L, [Picric acid] = 0.01 mol/L, [Sr]=40 mg/L)

شکل ۱- اثر نوع کرون اتر بر درصد استخراج استرانسیم

شرایط آزمایش: (زمان ۵ دقیقه، دما ۲۵ درجه سلسیوس، حجم فاز آبی ۱۰ میلی لیتر، حجم فاز آلی ۱۰ میلی لیتر، استخراج کننده  $0.01 \text{ mol/L}$ ، [اسید پیکریک]  $0.01 \text{ mol/L}$ ، [استرانسیم]  $40 \text{ میلی گرم در لیتر}$ )





**Fig. 4.** Effect of picric acid concentration on strontium extraction percentage  
(Time=5 min, T= 25 °C, Aqueous volume =10 mL, Organic volume= 10 mL, Extractant= 0.01 mol/L, [Sr]=40 mg/L)

شکل ۴- اثر غلظت پیکریک اسید بر درصد استخراج استرانسیم شرایط آزمایش: (زمان ۵ دقیقه، دما ۲۵ درجه سلسیوس، حجم فاز آبی ۱۰ میلی لیتر، حجم فاز آلی ۱۰ میلی لیتر، استخراج کننده ۰/۰۱ mol/L، [استرانسیم] ۴۰ میلی گرم در لیتر)

### ۳-۱-۵- اثر غلظت اولیه استرانسیم در فاز آبی

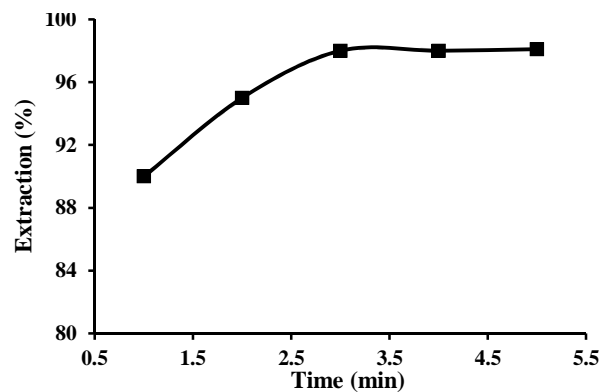
با استفاده از غلظت های مختلف یون استرانسیم ( $Sr^{2+}$ ) در فاز آبی، اثر غلظت استرانسیم بر استخراج آن بررسی شد (شکل ۵). همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود، در شرایط بهینه با افزایش غلظت یون فلزی، تا حدود ۱۶۰ میلی گرم در لیتر تغییری در درصد استخراج مشاهده نمی شود، ولی با افزایش غلظت یون فلزی در ورای این مقدار، به دلیل تکمیل ظرفیت کرون اثر استفاده شده، به تدریج درصد استخراج کاهش می یابد.

### ۳-۱-۶- طبیعت گونه های استخراج شده

ترکیب احتمالی گونه های استخراج شده، از نمودار لگاریتم ضریب توزیع ( $\log D$ ) در مقابل لگاریتم غلظت کرون اتر ( $\log[\text{crown}]$ ) در غلظت ثابت پیکریک اسید (۰/۰۱ mol/L) و لگاریتم ضریب توزیع در مقابل لگاریتم غلظت پیکریک اسید ( $\log[\text{picric}]$ ) در غلظت ثابت دی سیکلو هگزانو-۱۸-کرون-۶ (۰/۰۱ mol/L)، به ترتیب شکل های ۶ و ۷ محقق شد. شیب ها، به ترتیب، برابر ۰/۹۴ و ۱/۹۷ است، بنابراین دو آنیون پیکرات و یک کرون اتر در گونه استخراج شده شرکت می کند. گونه های استخراج شده در توافق با کارهای قبلی (Riddle et al., 2005, Todd et al., 2005, Ritcey and Ashbrook, 1984) احتمالاً ۲:۱:۱ به ترتیب کرون اتر، کاتیون فلزی و آنیون پیکرات است.

### ۳-۱-۳- اثر زمان اختلاط

یک رشته آزمایش در گستره زمانی ۲ تا ۵ دقیقه برای تعیین زمان بهینه برای استخراج استرانسیم انجام شد که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۳ مشخص است، زمان ۳ دقیقه برای انجام عمل اختلاط دو فاز کافی به نظر می رسد. با وجود این به منظور حصول اطمینان از اختلاط کامل فازها، مدت زمان ۵ دقیقه برای انجام آزمایش های بعدی انتخاب شد.



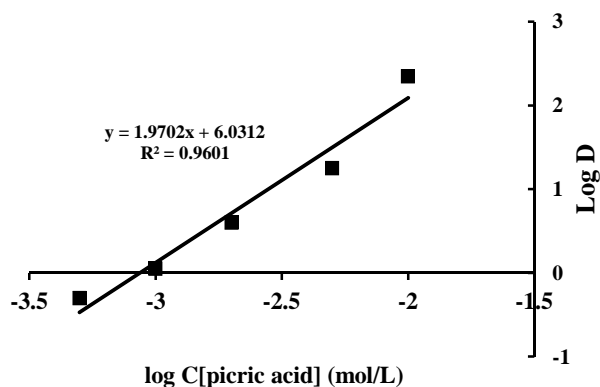
**Fig. 3.** Effect of time on strontium extraction percentage  
(T= 25 °C, Aqueous volume =10 mL, Organic volume= 10 mL, Extractant= 0.01 mol/L, [Picric acid] = 0.01 mol/L, [Sr]=40 mg/L)

### شکل ۳- اثر زمان بر درصد استخراج استرانسیم

شرایط آزمایش: (دما ۲۵ درجه سلسیوس، حجم فاز آبی ۱۰ میلی لیتر، حجم فاز آلی ۱۰ میلی لیتر، استخراج کننده ۰/۰۱ mol/L، [استرانسیم] ۴۰ میلی گرم در لیتر)

### ۳-۱-۴- اثر غلظت پیکریک اسید

اثر غلظت پیکریک اسید بر بازده فرایند استخراج استرانسیم بررسی شد که نتایج آنها در شکل ۴ ترسیم شده است. همان گونه که مشاهده می شود، در نبود پیکریک اسید در محیط استخراج، استرانسیم نمی تواند از فاز آبی خارج شود و با افزایش غلظت پیکریک اسید، درصد استخراج استرانسیم به شدت افزایش می یابد. در ورای غلظت ۰/۰۲ mol/L پیکریک اسید، درصد استخراج تقریباً ثابت می شود و دلیل این امر این دلیل است که غلظت کرون اتر ثابت مانده و این نشان می دهد که استخراج استرانسیم تنها به مقدار پیکریک اسید وابسته نیست، بلکه مقدار کرون اتر در فاز آلی نیز تأثیر خود را داشته و هر دو باید با هم افزایش پیدا کنند. غلظت ۰/۰۲ mol/L پیکریک برای ادامه کار مناسب تشخیص داده شد.



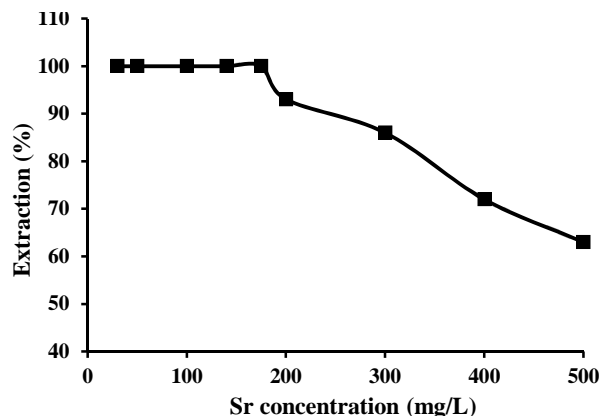
**Fig. 7.** Logarithm diagram of the distribution coefficient versus logarithm of picric acid concentration at 0.01 mol/L crown ether (Time=5 min, T= 25 °C, Aqueous volume =10 mL, Organic volume= 10 mL, Extractant= 0.01 mol/L, [Sr]=40 mg/L)

شکل ۷- نمودار لگاریتم ضریب توزیع در مقابل لگاریتم غلظت پیکریک اسید در غلظت ثابت کرون اتر (0.01 M) شرایط آزمایش: (زمان ۵ دقیقه، دما ۲۵ درجه سلسیوس، حجم فاز آبی ۱۰ میلی لیتر، حجم فاز آلی ۱۰ میلی لیتر، استخراج کننده ۰.۰۱ mol/L [استرانسیم] ۴۰ میلی گرم در لیتر)

### ۳-۱-۷- اثر pH

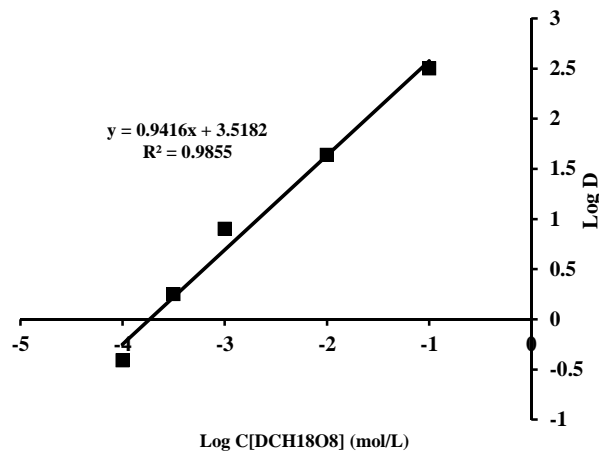
اثر pH محلول آبی بر درصد استخراج استرانسیم، در pH های مختلف بررسی شد. برای تنظیم pH محلول ساختگی، از سدیم هیدروکسید و هیدروکلریک اسید استفاده شد. شکل ۸ نتایج حاصل از این آزمایش ها را ترسیم می کند. نتایج حاکی از آن است که کاهش pH از ۵ تا حدود ۲/۱۵ تأثیری بر مقدار استخراج استرانسیم ندارد ولی پس از آن درصد استخراج استرانسیم به طور قابل توجهی از ۱۰۰ درصد به ۷۰ درصد کاهش می یابد. دلیل این کاهش احتمالاً در این است که چون استخراج استرانسیم از فاز آبی نیاز به آنیون های پیکرات در فاز آبی دارد و از طرفی آنیون های پیکرات از تفکیک پیکریک اسید حاصل می شوند،

بنابراین افزایش غلظت یون های هیدروژن در فاز آبی مانع از این کار می شود (اصل لوشاتلیه) و به نحوی باعث کاهش غلظت آنیون پیکرات در محلول آبی می شود. کاهش غلظت آنیون پیکرات نیز، همان طور که پیش تر مشاهده شد، درصد استخراج استرانسیم را کاهش می دهد. پس pH محلول باید در محدوده  $pH > 2/15$  باشد (pH واقعی محلول فروشویی حدود ۲/۷ بود).



**Fig. 5.** The effect of the initial concentration of strontium in the aqueous phase on the percentage of strontium extraction (Time=5 min, T= 25 °C, Aqueous volume =10 mL, Organic volume= 10 mL, Extractant= 0.01 mol/L, [Picric acid] = 0.01 mol/L)

شکل ۵- اثر غلظت اولیه استرانسیم در فاز آبی بر درصد استخراج استرانسیم شرایط آزمایش: (زمان ۵ دقیقه، دما ۲۵ درجه سلسیوس، حجم فاز آبی ۱۰ میلی لیتر، حجم فاز آلی ۱۰ میلی لیتر، استخراج کننده ۰.۰۱ mol/L [اسید پیکریک] ۰.۰۱ mol/L)

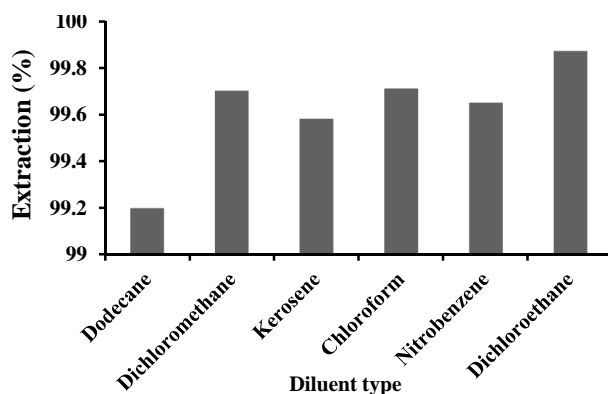


**Fig. 6.** Logarithm diagram of the distribution coefficient versus logarithm of crown ether concentration at 0.01 mol/L picric acid (Time=5 min, T= 25 °C, Aqueous volume =10 mL, Organic volume= 10 mL, [Picric acid] = 0.01 mol/L)

شکل ۶- نمودار لگاریتم ضریب توزیع در مقابل لگاریتم غلظت کرون اتر در غلظت ثابت پیکریک اسید شرایط آزمایش: (زمان ۵ دقیقه، دما ۲۵ درجه سلسیوس، حجم فاز آبی ۱۰ میلی لیتر، حجم فاز آلی ۱۰ میلی لیتر، [اسید پیکریک] ۰.۰۱ mol/L)

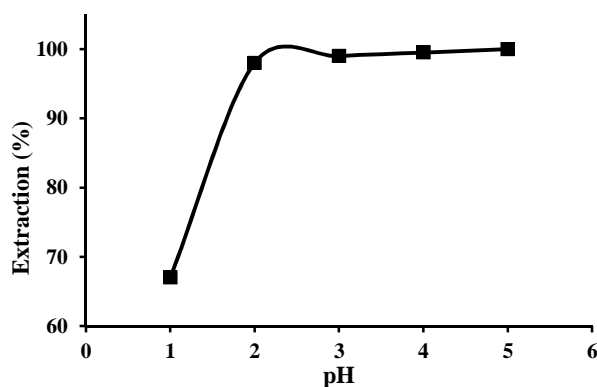






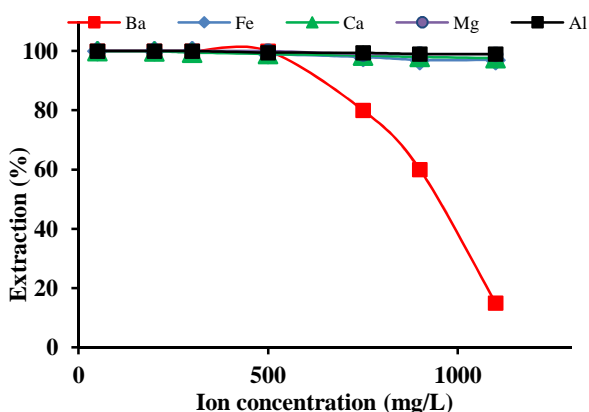
**Fig. 9.** Effect of diluent type on strontium extraction percentage (Time=5 min, T= 25 °C, Aqueous volume =10 mL, Organic volume= 10 mL, Extractant= 0.01 mol/L, [Picric acid] = 0.01 mol/L, [Sr]=40 mg/L)

شکل ۹- اثر رقیق کننده‌های مختلف بر درصد استخراج استرانسیم شرایط آزمایش: (زمان ۵ دقیقه، دما درجه سلسیوس، حجم فاز آبی ۱۰ میلی‌لیتر، حجم فاز آلی ۱۰ میلی‌لیتر، استخراج کننده ۰/۰۱ mol/L، [پیکریک اسید] ۰/۰۱ mol/L، [استرانسیم] ۴۰ میلی‌گرم در لیتر)



**Fig. 8.** Effect of pH on strontium extraction percentage (Time=5 min, T= 25 °C, Aqueous volume =10 mL, Organic volume= 10 mL, Extractant= 0.01 mol/L, [Picric acid] = 0.01 mol/L, [Sr]=40 mg/L)

شکل ۸- اثر pH فاز آبی بر درصد استخراج استرانسیم شرایط آزمایش: (زمان ۵ دقیقه، دما ۲۵ درجه سلسیوس، حجم فاز آبی ۱۰ میلی‌لیتر، حجم فاز آلی ۱۰ میلی‌لیتر، استخراج کننده ۰/۰۱ mol/L، [پیکریک اسید] ۰/۰۱ mol/L، [استرانسیم] ۴۰ میلی‌گرم در لیتر)



**Fig. 10.** Effect of coexisting ions on strontium extraction percentage (Time=5 min, T= 25 °C, Aqueous volume =10 mL, Organic volume= 10 mL, Extractant= 0.01 mol/L, [Picric acid] = 0.01 mol/L)

شکل ۱۰- اثر یون‌های خارجی بر استخراج استرانسیم

شرایط آزمایش: (زمان ۵ دقیقه، دما ۲۵ درجه سلسیوس، حجم محلول آبی ۱۰ میلی‌گرم، حجم محلول آلی ۱۰ میلی‌گرم، استخراج کننده ۰/۰۱ mol/L، [پیکریک اسید] ۰/۰۱ mol/L)

استرانسیم ندارند. می‌توان این نتیجه را این گونه تحلیل کرد که انتخاب پذیری دی‌سیکلو هگزیل که ممکن است به خاطر ساختار آن و قطر حفره آن باشد، مانع از ورود یون‌های این عناصر به داخل حلقه کرون اتر (حلقه میزبان) می‌شود، اما باریم به خاطر داشتن

### ۸-۱-۳- اثر رقیق کننده‌ها

برای انتخاب رقیق کننده مناسب برای استخراج استرانسیم، نرمال-دودکان، دی‌کلرومتان، کروزن، کلروفرم، نیتروبنزن و ۱، ۲، دی‌کلرو اتان به عنوان رقیق کننده مورد بررسی تجربی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده با این رقیق کننده‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است. رقیق کننده‌های استفاده شده تقریباً همگی نتایج خوبی برای استخراج استرانسیم از خود نشان دادند، ولی با این حال ۱، ۲، دی‌کلرو اتان، در توافق با پژوهش‌های (Gupta et al., 2003, Vibhute and Khopkar, 1991) قابلیت بیشتری برای این کار نشان داد و برای تمامی آزمایش‌ها انتخاب شد.

### ۹-۱-۳- اثر یون‌های خارجی

با توجه به وجود عناصری مانند آهن، آلومینیم، منیزیم و کلسیم با غلظت‌های زیاد در محلول فروشویی سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی و اثر منفی آنها بر استخراج استرانسیم، در محیط‌های ساختگی نیز اثر این یون‌ها بررسی شد. اثر باریم نیز به خاطر شباهت و رقابت زیاد آن با استرانسیم بررسی شد. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، یون‌های عناصر آهن، منیزیم، کلسیم و آلومینیم تا غلظت ۱ گرم در لیتر تأثیری در میزان استخراج



### ۳-۳- استخراج معکوس یون فلزی

نتایج آزمایش‌های استخراج معکوس استرانسیم از فاز آلی باردار در فاز آبی تازه با استفاده از نیتریک و هیدروکلریک اسید با غلظت‌های متفاوت در شکل ۱۱ داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت هر یک از اسیدها میزان بازیابی استرانسیم از فاز آلی باردار افزایش می‌یابد، ولی نیتریک اسید نسبت به هیدروکلریک اسید بهتر عمل می‌کند تا جایی که در غلظت  $6 \text{ mol/L}$  آن در حدود ۶۰ درصد استرانسیم از فاز آلی بازیابی می‌شود.

### ۴- نتیجه‌گیری

در محلول فروشویی سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی مقدار قابل توجهی استرانسیم فلزی وجود دارد. غلظت استرانسیم در محلول فروشویی در حدود ۴۰ میلی‌گرم در لیتر است. هدف این پژوهش، استخراج حلالی استرانسیم از محلول فروشویی سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی است. عوامل مؤثر بر استخراج استرانسیم از محلول‌های سولفات ساختگی بررسی شد. با توجه به نتایج، غلظت پیکریک اسید در انتقال کمپلکس‌های  $6\text{-C-}128\text{-Sr-DC}$  به فاز آلی نقش عمده‌ای دارد.

با افزودن  $0.01 \text{ mol/L}$  پیکریک اسید به فاز آبی حاوی  $\text{mg/L}$  ۴۰ استرانسیم، ۹۲ درصد استرانسیم در فاز آبی حاوی  $0.01$  مول  $6\text{-C-}18\text{-DC}$  در حلال آلی ۱، ۲، دی‌کلرو اتان استخراج می‌شود. گونه استخراج شده، احتمالاً ۱:۱:۲ به ترتیب کرون اتر، کاتیون فلزی و آنیون پیکرات است.

از تجزیه و تحلیل شیب، تشکیل کمپلکس زوج یون  $[DC\ 18\ C\ 6 - M - A_2]$  که در آن،  $6\text{-C-}18\text{-DC}$  کرون اتر،  $M$  فلز قلیایی و قلیایی خاکی از جمله استرانسیم، و  $A$  یون پیکرات است، تعیین شد. یون‌های عناصر آهن، منیزیم، کلسیم و آلومینیم تا غلظت ۱ گرم در لیتر تأثیری در مقدار استخراج استرانسیم ندارند ولی باریم در غلظت‌های زیاد حدود ۱ گرم در لیتر درصد استخراج استرانسیم را تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد.

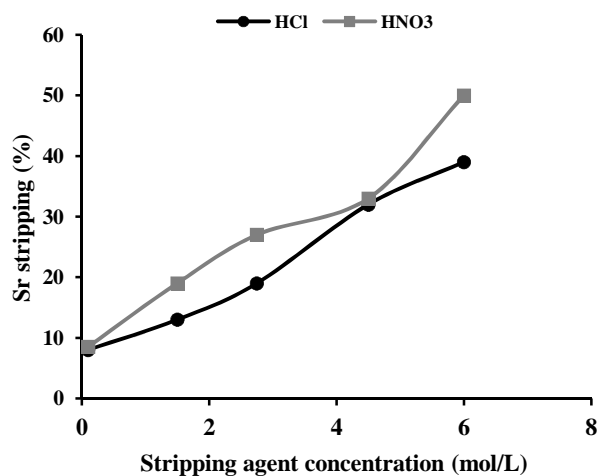
با افزایش غلظت نیتریک و هیدروکلریک اسید، مقدار بازیابی استرانسیم از فاز آلی افزایش می‌یابد، ولی نیتریک اسید نسبت به هیدروکلریک اسید بهتر عمل می‌کند. در نهایت این که کرون اتر مورد نظر ( $6\text{-C-}18\text{-DC}$ ) توانست

شبهات فیزیکی و شیمیایی با استرانسیم، در ورود به داخل حلقه دی‌سیکلو هگزیل، با استرانسیم رقابت کرده و در غلظت‌های زیاد حدود ۱ گرم در لیتر درصد استخراج استرانسیم را تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد، ولی از آن جا که غلظت آن در محلول فروشویی سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی چندان بالا نیست، مزاحمت زیادی در استخراج استرانسیم ایجاد نمی‌کند.

### ۳-۲- استخراج استرانسیم از محلول زیرصافی

در آزمایش استخراج استرانسیم از محلول زیرصافی ( $\text{pH}$  واقعی حدود  $2/7$ ) با یک مرحله استخراج با  $0.01/0.1$  مول  $6\text{-C-}18\text{-DC}$  در ۱، ۲، دی‌کلرو اتان، بازیابی  $3/92$  درصد استرانسیم در فاز آلی فراهم شد.

با توجه به نتایج به دست آمده برای روش استخراج با حلال، لی‌گاند دی‌سیکلو هگزیل ۱۸ کرون ۶، می‌تواند استرانسیم را به خوبی و با انتخاب پذیری بالا نسبت به دیگر عناصر از محلول فروشویی سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی بازیابی کند.



**Fig. 11.** Relationship between stripping type and concentration and strontium recovery from the organic phase in optimal conditions. (Time=5 min,  $T=25^\circ\text{C}$ , Aqueous volume = 10 mL, Organic volume = 10 mL, Extractant = 0.01 mol/L, [Picric acid] = 0.01 mol/L)

شکل ۱۱- رابطه بین نوع و غلظت عریان‌ساز و بازیابی استرانسیم از فاز آلی باردار شده در شرایط بهینه شرایط آزمایش: (زمان ۵ دقیقه، دما ۲۵ درجه سلسیوس، حجم محلول آبی ۱۰ میلی‌گرم، حجم محلول آلی ۱۰ میلی‌گرم، استخراج‌کننده  $0.01/0.1$ ، [پیکریک اسید]  $0.01/0.1 \text{ mol/L}$ )



## ۵- قدردانی

نویسندگان پژوهش از حمایت‌های همه جانبه پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای کمال تقدیر و تشکر دارند.

۹۲/۳۰ درصد استرانسیم را از محلول زیرصافی متناظر با محلول فروشویی سنگ‌های متاسوماتیک ایران مرکزی، در یک مرحله، استخراج کند.

## References

- Bingöl, D., Aydoğan, S. & Bozbaş, S. K. 2012. Production of  $\text{SrCO}_3$  and  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  by the dry mechanochemical processing of celestite. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18, 834-838.
- Dozol, J., Asfari, Z., Arnaud-Neu, F., Vicens, J. & Thuery, P. 2004. Extraction of rubidium and caesium from strongly alkaline media. *Radiochimica Acta*, 92, 175-182.
- Dozol, J., Dozol, M. & Macias, R. 2000. Extraction of strontium and cesium by dicarbollides, crown ethers and functionalized calixarenes. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 38, 1-22.
- Gupta, K., Achuthan, P., Ramanujam, A. & Mathur, J. 2003. Effect of diluents on the extraction of  $\text{Sr}^{2+}$  from  $\text{HNO}_3$  Solutions with dicyclohexano-18-crown-6. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 21, 53-71.
- Hafizi, M. 2009. The study of effective parameters on Sr extraction from leach solution of metasomatit by solvent extraction and ion exchange method. MSc. Thesis, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian)
- He, L., Wong, X., Yang, D., Jiao, R. & Song, C. 1993. *Removal of strontium from high-level radioactive waste with crown-ether extraction*. China Nuclear Information Centre, China.
- Horwitz, E. P., Dietz, M. L. & Fisher, D. E. 1990. Extraction of strontium from nitric acid solutions using dicyclohexano-18-crown-5 and its derivatives. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 8, 557-572.
- Kimura, K., Maeda, T. & Shono, T. 1979. Extraction of alkali metal picrates with poly-and bis (crown ethers). *Talanta*, 26, 945-949.
- Kumar, A., Mohapatra, P., Pathak, P. & Manchanda, V. 1997. Dicyclohexano 18 crown 6 in butanol-octanol mixture: a promising extractant of Sr (II) from nitric acid medium. *Talanta*, 45, 387-395.
- Mohapatra, P., Lakshmi, D. & Manchanda, V. 2006. Diluent effect on Sr (II) extraction using di-tert-butyl cyclohexano 18 crown 6 as the extractant and its correlation with transport data obtained from supported liquid membrane studies. *Desalination*, 198, 166-172.
- Omidvari, N. 2007. Surveying the ability of recovery of rubidium from leach solution of anomaly No. 5 of Saghand area. MSc. Thesis, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. (In Persian)
- Owusu, G. & Litz, J. E. 2000. Water leaching of SrS and precipitation of  $\text{SrCO}_3$  using carbon dioxide as the precipitating agent. *Hydrometallurgy*, 57, 23-29.
- Patai, S. 1980. *Chemistry of ethers, crown ethers, hydroxyl groups and their sulphur analogues*, Wiley, USA.
- Patai, S. & Rappoport, Z. 1989. *Crown ethers and analogs*, Wiley, USA.
- Pedersen, C. J. 1967. Cyclic polyethers and their complexes with metal salts. *Journal of the American Chemical Society*, 89, 7017-7036.



- Raut, D., Mohapatra, P. & Manchanda, V. 2009. Role of diluent on the extraction and transport of strontium using 4, 4'(5') di-tert-butyl-dicyclohexano-18-crown-6 (DTBCH<sub>18</sub>C<sub>6</sub>) as the extractant. *Radiochimica Acta International Journal for Chemical Aspects of Nuclear Science and Technology*, 97, 565-570.
- Riddle, C. L., Baker, J. D., Law, J. D., Mcgrath, C. A., Meikrantz, D. H., Mincher, B. J., et al. 2005. Fission product extraction (FPEX): development of a novel solvent for the simultaneous separation of strontium and cesium from acidic solutions. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 23, 449-461.
- Ritcey, G. M. & Ashbrook, A. 1984. *Solvent extraction. principles and applications to process metallurgy. Part I*, Elsevier Scientific Publishing Company, Michigan, USA.
- Sadakane, A., Iwachido, T. & Tôei, K. 1975. The extraction of alkali metal picrates with dibenzo-18-crown-6. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 48, 60-63.
- Takeda, Y., Taguchi, R. & Katsuta, S. 2004. Study on solute-solvent and solute-solute interactions for the dibenzo-24-crown-8-alkali metal picrate extraction system. *Journal of Molecular Liquids*, 115, 139-147.
- Todd, T., Law, J., Herbst, R., Meikrantz, D., Peterman, D., Riddle, C., et al. 2005. Advanced technologies for the simultaneous separation of cesium and strontium from spent nuclear fuel. *WM' 05 Conference*, Tucson, Arizona, USA.
- Vibhute, R. & Khopkar, S. 1991. Solvent extraction separation of cesium with dibenzo-24-crown-8 from picrate solution. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 152, 487-496.
- Xu, C., Ye, G., Wang, S., Duan, W., Wang, J. & Chen, J. 2013. Solvent extraction of strontium from nitric acid medium by di-tert-butyl cyclohexano-18-crown-6 in n-octanol: extraction behavior and flowsheet demonstration. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 31, 731-742.
- Ye, G., Luo, F., Jiang, Y., Chen, W. & Ding, S. 2001. Study on the extraction of strontium with amido podand. *Atomic Energy Science and Technology*, 35, 344-350.

